

## ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110

*Ключевые слова:* импульсная лазерная сварка, циркониевый сплав, свойства сварного соединения.

В настоящее время наиболее широко используемыми конструкционными материалами для изготовления тепловыделяющих сборок ядерных реакторов являются циркониевые сплавы. Несмотря на то что их использование в атомной энергетике длится более семи десятков лет, количество работ, посвященных оптимизации технологии изготовления и эксплуатации изделий из циркониевых сплавов, не уменьшается. Существенную роль в обеспечении их надежности играют сварные соединения, эксплуатационные свойства которых во многом определяются наличием в сварном шве и зоне термического влияния загрязнений, остаточных напряжений и закалочных структур. Перечисленные факторы обуславливают высокий интерес к оптимизации технологий, позволяющих формировать соединения со стабильно высокими характеристиками. Одним из перспективных методов является лазерная сварка. Однако количество публикаций, посвященных данному способу соединения сплавов из циркония, незначительно, причем все имеющиеся работы акцентируют внимание на сплавах Zircaloy. Исследования же по лазерной сварке Э110 и других отечественных сплавов циркония с ниобием отсутствуют, в связи с чем данное направление работ видится актуальным.

Целью настоящей работы являлась многофакторная оптимизация энергетических параметров режимов лазерной сварки при формировании стыковых соединений деталей из циркониевого сплава Э110. В качестве свариваемых модельных образцов были выбраны пластины размерами 250×50×0,5 мм. Для обеспечения требуемого зазора между свариваемыми деталями, максимальное значение которого составляет 0,1 мм, торцы предварительно были обработаны на фрезерном станке. Перед сваркой кромки деталей были тщательно очищены ацетоном от жиров и других загрязнений. Эксперимент проводили на аппарате для лазерной сварки ЛТА-4-2, позволяющем регулировать ток в лампах накачки  $I$  (данный

параметр связан с энергией импульса  $E$  линейной зависимостью), длительность импульса  $\tau$  и частоту следования импульсов  $f$ . Погонная энергия при сварке  $q/v$  была постоянной, при этом варьировали скорость сварки  $V$  и энергетические параметры импульса, от которых зависела мощность  $P$  и расчетные значения перекрытия  $PO$  (таблица 1). Диаметр лазерного луча устанавливали 0,95 мм. В качестве защитного газа, подаваемого в зону сварки и к корню шва с расходом 60 л/мин, применяли аргон высшего сорта с чистотой не менее 99,993 %. Механические испытания проводили на машине МИРИ-100К. Стереомикроскоп Olympus SZ61 использовали для оценки внешнего вида сварных швов, РЭМ JCM-6000 – для изучения фрактографий поверхности разрушения.

На всех режимах было достигнуто полное проплавление образцов, однако в некоторых случаях возникли дефекты сварных соединений. При увеличении тока выше 100 А происходит перегрев металла: значительно расширяется ЗТВ и ярко выражены цвета побежалости. Также на образцах, сваренных при значениях тока 110 и 120 А, образуются трещины и разбрызгивание в корне шва. Повышение частоты следования импульсов с 5 до 9 Гц также привело к образованию трещин по всей поверхности шва и широкой ЗТВ с ярко выраженными цветами побежалости. При увеличении длительности импульса поверхностных дефектов не возникло. На рис. 1 и 2 приведены зависимости влияния параметров импульса сварки на ширину шва и временное сопротивление разрыву сварного соединения, анализ которых позволяет сделать вывод об отсутствии между ними корреляции.

Таблица 1

Параметры режима лазерной сварки

$q/v$ , кДж/мм	$I$ , А	$\tau$ , мс	$E$ , Дж	$V$ , мм/с	$f$ , Гц	$P_{\text{пиковая}}$ , кВт	$P_{\text{средняя}}$ , Вт	$PO_{\text{расч}}$
0,7	90	14	8,68	0,88	3	0,62	26,03	0,69
	100		10,88	1,12		0,78	32,64	0,61
	110		12,86	1,35		0,92	38,57	0,53
	120		14,95	1,49		1,07	44,84	0,48
	100	10	8,12	1,12	3	0,81	24,36	0,61
		12	9,50			0,79	28,50	0,61
		16	12,26			0,77	36,78	0,61
	100	14	10,88	1,12	5	0,78	54,40	0,76
			10,88		7	0,78	76,16	0,83
			10,88		9	0,78	97,92	0,87

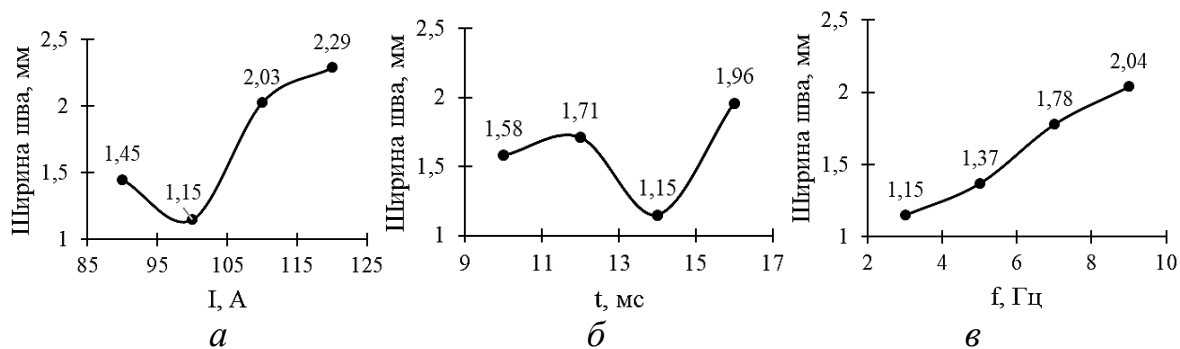


Рис. 1. Влияние параметров режима на ширину шва: *a* – тока в лампах накачки, при  $\tau = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ; *б* – длительности импульса при  $I = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ; *в* – частоты следования импульса при  $I = \text{const}$ ,  $\tau = \text{const}$

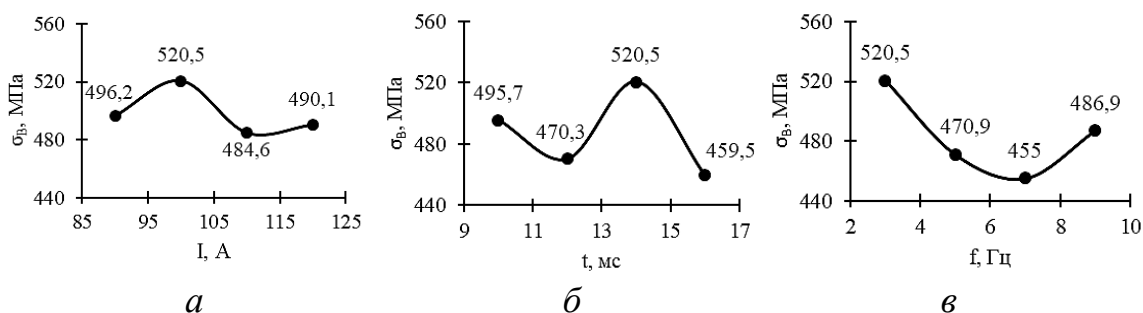


Рис. 2. Временное сопротивление разрыву в зависимости от: *a* – тока в лампах накачки, при  $\tau = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ; *б* – длительности импульса при  $I = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ; *в* – частоты следования импульса при  $I = \text{const}$ ,  $\tau = \text{const}$

В результате проведения эксперимента были определены наиболее рациональные, из исследуемых, режимы для импульсной лазерной сварки модельных образцов из сплава Э110 толщиной 0,5 мм. Критериями оценивания были отсутствие дефектов, внешний вид и геометрические параметры шва, место разрушения (шов, ЗТВ или основной металл) и фрактограммы при испытании на прочность. Было выявлено, что нецелесообразно увеличивать ток в лампах накачки выше 100 А и частоту следования импульсов выше 3 Гц. Изменение длительности импульса в исследованных пределах оказало влияние только на ширину шва и коэффициент перекрытия. Приведенные результаты являются первоначальными в проводимой серии исследований. В настоящее время осуществляются работы по изучению микроструктуры сварных соединений, а также их стойкости против коррозии, высокотемпературного окисления, воздействия водорода и радиации.